

固定于发射台架起落架上部, 然后通过方位回转和高低俯仰装置将导弹调转至规定的射向和射角, 完成导弹发射前的准备工作。

1.1 地面发射台架

如图 2 所示, 地面发射台架由基座、方位回转装置、高低俯仰装置、回转平台、起落架、发射装置锁紧机构、瞄准装置和电源等组成。除基座外, 均借用已有产品成熟技术及结构, 以加快研制周期、提高产品可靠性。基座采用钢材焊接加工而成, 保证其最大承载能力不小于 5 t。

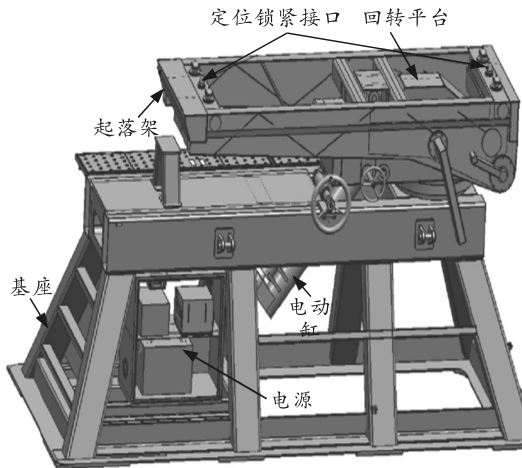


图 2 地面发射台架 3 维模型

地面发射台架通过地脚螺栓固定于发射阵地。方位回转装置包括电机、减速器、齿轮、回转平台、解锁/锁紧机构、手动转向装置等, 调转范围为 $\pm 30^\circ$, 精度为 $5'$; 高低俯仰装置包括电动缸、起落架、解锁/锁紧机构、手动起落装置等, 可实现起落架在 $0^\circ \sim +80^\circ$ 起落, 精度为 $5'$; 发射装置锁紧机构位于起落架上部, 可通过手动方式实现起落架与发射装置之间的锁紧和解锁; 瞄准装置位于发射台架左侧, 标定精度小于 $2'$ 。

1.2 发射装置

如图 3 所示, 发射装置由导轨组件、框架、前后起吊钩、闭锁挡弹块、前后两组辅助支撑机构、射向标记等组成。发射装置主体由钢材焊接、机加而成, 具有较高的刚强度, 能够承受导弹的发射冲击且满足吊装、短途运输的要求; 为降低加工难度, 发射导轨采用多段分别加工、整体装配的方式进行加工生产, 导轨安装基准面采用大型龙门铣床整体加工而成。发射装置内部具有较大的操作空间, 便于导弹的装填和退出, 同时也提升了导弹的发射安全性。

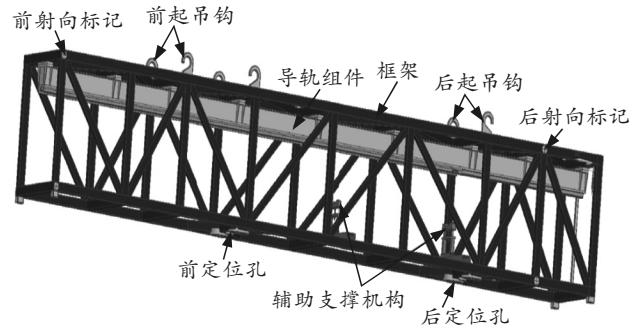


图 3 发射装置 3 维模型

发射装置整体采用框架式结构, 用于安装和支撑导轨组件和其他结构件。导轨组件包括导轨安装座和发射导轨, 导轨安装座通过螺钉安装于发射装置上部, 发射导轨用于发射过程中导弹在轨滑行。发射导轨采用顺序离轨(导弹下挂)的发射方式, 同时在发射导轨后部设置挡弹块, 用于限制导弹向后移动, 在导弹滑块前部设置锁弹销, 防止起吊、运输过程中导弹向前滑行, 发射前, 可通过手动方式解除锁弹销。

在发射装置顶部设置 3 组吊装接口, 用于空载和满载 2 种状态下发射装置的平稳吊装。在发射装置前后位置设置了 2 组射向标记, 用于对发射装置射向、射角的校准。发射装置内部设置有前后 2 组辅助支撑机构, 用于在运输、起吊过程中对导弹进行辅助支撑, 为避免发射过程中与导弹发生碰撞, 发射前应拆除。发射装置底部设置有安装和定位接口, 用于发射装置与地面发射台架起落架之间的定位和锁紧。

2 工作原理

发射前, 首先选定一处平整坚实的发射阵地, 可粗略地按理论射向将地面发射台架放置于发射阵地, 通过地脚螺栓将地面发射台架基座固定于地面上; 然后将发射装置(带弹)吊装到起落架上, 待发射装置与起落架之间的定位销对齐且到位后, 通过锁紧机构将发射装置锁定。

地面发射台架和发射装置对接完成后, 拆除发射装置内部的辅助支撑机构, 解除发射导轨上的锁弹销, 用起落架侧方的瞄准装置对射向进行瞄准, 通过方位回转和高低俯仰装置将起落架调转至规定的射向、射角, 最后用经纬仪对射向、射角进行复核, 根据需要对实际射向进行微调。

用石棉布对导弹尾部发控电缆进行防护, 然后将发控航插、发控电缆固定于发射装置后端并延伸至地面发控装置。至此即完成发射前的准备工作。

3 发射动力学仿真分析

为验证简易地面发射系统的稳定性，提升发射安全性，笔者基于多体运动学理论方法，建立简易地面发射系统的发射动力学仿真分析模型^[9-13]。

3.1 建模与边界条件

为简化模型，提高仿真效率，将地面发射台架及发射装置均设置为刚体。发射台架与地面之间设置为固定连接；将发射导轨与导弹滑块之间设置为接触对，用于模拟发射过程中的接触碰撞，给定摩擦系数为 0.15；发射装置与起落架之间设置为固定连接，起落架与回转平台之间设置为铰链，起落架绕铰接位置转动，用弹簧模拟驱动起落架的电动缸，给定弹簧刚度为 $4 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。

为得到发射过程中导弹的位置和姿态变化情况，在发射导轨和导弹质心位置分别建立局部坐标系，计算过程中，提取导弹质心位置局部坐标系相对于发射导轨局部坐标系之间的相对变化关系，得到导弹在发射过程中的位移、速度、姿态和发射扰动等变化情况。综上所述，即可建立如图 4 所示的地面简易发射系统发射动力学仿真分析模型。

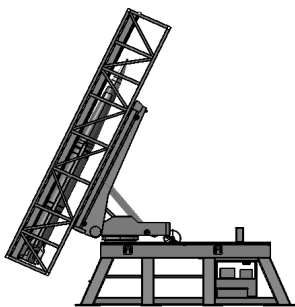


图 4 发射动力学仿真分析模型

3.2 计算方法

根据多体系统动力学计算方法，发射过程中发射系统的动力学方程^[10]可表示为：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： \mathbf{M} 为发射系统质量矩阵； Φ_q 为约束方程雅克比矩阵； λ 为拉格朗日乘子； $\ddot{\mathbf{q}}$ 为加速度； $\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ 为作用力； γ 为加速度公式中的 2 阶倒数项。其中，系统约束方程可表示为

$$\Phi(\mathbf{q}, t) = 0 \quad (2)$$

针对该地面简易发射系统，根据上述建模方法、边界条件、加载载荷和仿真计算方法，即可通过求解上述微分代数方程，得到发射过程中导弹在导轨

内的运动情况以及整个发射系统的扰动情况。

3.3 仿真分析

基于上述仿真分析模型，对地面简易发射系统进行发射动力学仿真分析。实验条件如下：导轨长度为 7 100 mm，导弹质量为 1 500 kg，推力偏心为上偏 2 mm，质量偏心为下偏 2 mm，高低射角为 60° ，方位角为 0° 。根据给定的发动机推力曲线，基于多体动力学软件 LMS Virtual. Lab Motion^[6]，对上述发射系统进行发射动力学仿真分析。图 5 给出了导弹在发射装置内部的运动情况。

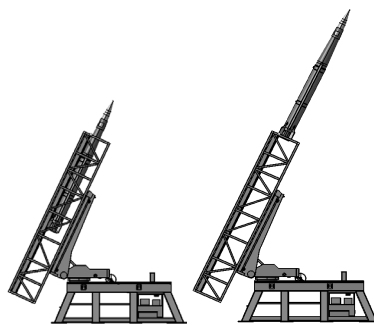


图 5 发射动力学仿真分析中导弹离轨过程

图 6 为导弹在发射过程中的速度变化曲线，根据仿真分析结果可知，导弹离轨时刻飞行时间为 0.767 s，速度为 20.992 m/s。

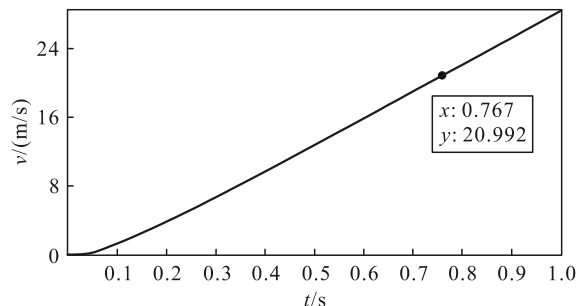


图 6 发射过程中导弹速度变化

图 7 为发射过程中导弹的质心相对于发射导轨在垂直方向的变化曲线。由图可知，导弹离开发射装置时刻导弹质心沿射向垂直方向的下沉量约为 24.1 mm。

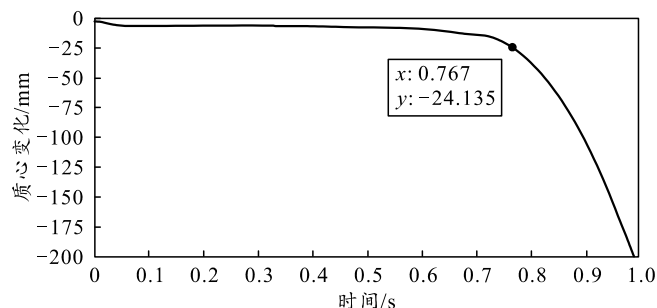


图 7 发射过程中导弹质心变化

图 8 和图 9 给出了发射过程中导弹的俯仰、偏航及滚转角和角速度变化曲线。由图中可以看出：导弹离开发射装置时，弹体俯仰角为 0.526° ，滚转角为 0.001° ，偏航角为 -0.014° ；俯仰角速度为 0.09 rad/s ，滚转角速度为 0.0003 rad/s ，偏航角速度为 0.0003 rad/s 。

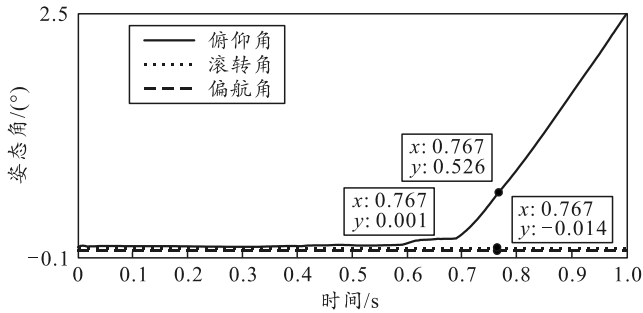


图 8 发射过程中导弹姿态角变化

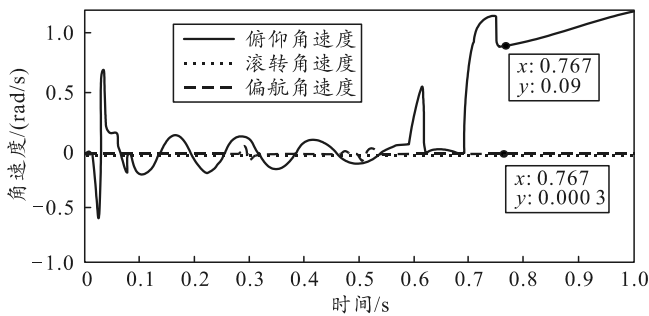


图 9 发射过程中导弹姿态角速度变化

4 结论

笔者设计一种操作简单、可靠性高、适用范围大的地面简易发射系统，并建立刚体动力学仿真分析模型，采用多体动力学的仿真分析方法，进行发射动力学仿真分析。仿真分析结果表明：该地面简易发射系统具有较好的稳定性，发射初始扰动较小，能够满足控制系统对导弹飞行姿态的要求。

在某次发射试验中，通过高速摄像测得导弹离轨时间为 0.813 s ，速度为 21.45 m/s ，导弹离轨后，飞行姿态平稳，与仿真分析结果基本一致。实验结

果表明：该地面简易发射系统具有较高的结构稳定性和发射安全性，满足发射需求。

通过更换发射装置或使用转接装置，该地面简易发射系统也可用于其他导弹的发射任务，具有一定的通用性。

参考文献：

- [1] 李忠于, 李智, 张敏强. 某中近程防空导弹发射车设计与分析[J]. 火控雷达技术, 2015(3): 31-36.
- [2] 武信, 刘任. 我本英雄: 中国 FLV-1 近程轻型车载防空导弹武器系统[J]. 兵器知识, 2004(7): 12-15.
- [3] 李海阁. 某自行高炮武器系统导弹发射装置设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] 韩晓明, 李彦彬, 徐超. 防空导弹总体设计原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2016: 6.
- [5] 于雅丽, 贾红莉, 崔家慎. 通用发射控制系统的研究与应用[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(5): 1248-1250.
- [6] 芮筱亭. 多体系统发射动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 3.
- [7] 郑民达, 周国仪. 火箭发射动力学仿真不同理论方法的对比研究[J]. 弹箭与制导学报, 1998(4): 17-21.
- [8] 芮筱亭, 负来峰, 陆毓琪, 等. 多管火箭发射动力学研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(5): 556-561.
- [9] 麻小明, 刘馨心, 李正宇, 等. 某车载防空系统行进间发射动力学仿真分析与研究[J]. 弹箭与制导学报, 2019(1): 151-154.
- [10] 喻天翔, 张玉刚, 万晓峰, 等. LMS Virtual. Lab Motion 进阶与案例教程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2017: 20-25.
- [11] 李庚, 薛海瑞, 胡建国, 等. 某新型发射系统发射动力学建模与仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 211-214.
- [12] 傅德彬, 姜毅. 基于刚柔耦合模型的发射装置动力学仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1789-1791.
- [13] 高星斗, 毕世华, 陈阵. 车载导弹多体发射动力学仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(6): 60-62.